МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НЕДОБОРА УРОЖАЯ ОТ ПЕРЕУПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ ДВИЖИТЕЛЯМИ СЕЛЬХОЗМАШИН

ГОДЖАЕВ Захид Адыгезалович, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

ЛАВРОВ Александр Владимирович, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

РУСАНОВ Александр Вадимович, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

ЗАГОРУЙКО Михаил Геннадьевич, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

Исследования по оценке влияния движителей различной сельскохозяйственной техники на изменение характеристик почвы и урожая во всех странах проводят, с использованием мобильных энергосредств (МЭС), которыми в модельных опытах укатывают почву с различной кратностью проходов по полям. С учетом того, что на продуктивность полей влияет сложение пахотных и подпахотных слоев разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать недобор урожая от воздействия сельхозмашин при выполнении различных технологических операций с учетом ширины следа энергосредства, конструктивной ширины захвата агрегата и зоны перекрытия. Разработана методика корректного определения показателей математической модели, включающего установление по набору сопряженных данных по плотности слоя почвы 0-40 см и величины максимального урожая конкретных культур, показателя степени модели, а после подстановки этих показателей в преобразованное уравнение, соответствующее математической модели, определение входящих в него коэффициентов. Используя полученную математическую модель, выполнена расчетная оценка эффективности снижения давления на почву задних шин свеклоуборочного комбайна РКМ-6 в 1,4 раза путем замены шин 21,3-24 на шины 21,3-26 с получением данных по изменению в слоях 0-20 и 20-40 см плотности почвы по следам комбайна РКМ-6 с указанными вариантами шин.

Введение. При всей сложности проблемы разработки обобщенной оценки изменения плодородия почв от их уплотнения движителями [6], обусловленной динамическим характером изменения во времени физических характеристик почвы, вариабельностью агрохимических её показателей, урожайностью, погоднo-климатических условий при проведении опытов, накопленные многолетние результаты позволяют дать не только качественную, но и в первом приближении количественную оценку, то есть прогнозировать недобор урожая на различных технологических операциях с учетом ширины следа энергосредства, конструктивной ширины захвата агрегата и зоны перекрытия.

Методика исследований. Учитывая различное влияния на продуктивность полей плотности пахотных и подпахотных слоев в [4] предложена математическая модель, позволяющая определить изменение урожайности в зависимости от плотности как пахотных, так и подпахотных ее слоев. Затем эта модель была преобразована и получила вид в [5] формула (1)

$$\Delta Y_i = Y_{\max} \left[\left(C_{\text{п}} \cdot |R_{\text{СП}} - R_{\text{ОПТ}}| \cdot K_{\text{ВП}} \right)^n + \left(C_{\text{ПП}} \cdot |R_{\text{СПП}} - R_{\text{ОПТ}}| \cdot K_{\text{ВПП}} \right)^n \right], \quad (1)$$

где $Y_{\max}$ – максимальная урожайность, получаемая при $R_{\text{СП}} = R_{\text{СПП}} = R_{\text{ОПТ}}$ (для расчетов принимают равным урожаю данной культуры, получаемого в данной зоне в предшествующие 3–5 лет); $R_{\text{СП}}$, $R_{\text{СПП}}$ – плотности почвы в пахотном 0–20 см и подпахотном 20–40 см ее слоях, г/см³; $R_{\text{ОПТ}}$ – оптимальное значение плотностей почвы, г/см³; $C_{\text{п}}$, $C_{\text{ПП}}$ – коэффициенты для пахотного и подпахотного слоев поч-

вы, определяемые с использованием уравнения (1) и по табл. 1 в качестве примера, см³/г.

Коэффициенты восстановления плотности пахотного и подпахотного слоев почвы уравнения (1) равны:

$$K_{\text{ВП}} = \Delta \rho_{\text{ПВ}} / \Delta \rho_{\text{ПН}},$$

$$K_{\text{ВПП}} = \Delta \rho_{\text{ППВ}} / \Delta \rho_{\text{ППН}}, \quad (2)$$

где $\Delta \rho_{\text{ПН}}$, $\Delta \rho_{\text{ППН}}$ – разность плотностей почвы по следу и на контроле соответственно в пахотном и подпахотном слоях в момент ее уплотнения; $\Delta \rho_{\text{ПВ}}$, $\Delta \rho_{\text{ППВ}}$ – разность плотностей почвы по следу и на контроле соответственно в пахотном и подпахотном слоях в момент посева очередной культуры.

Разработанная математическая модель (1) может использоваться при любых значениях n и разностей плотностей почв, это связано с тем, что эта разность берется по абсолютной величине.

Результаты исследований. Результаты, полученные в ВИМе при проведении краткосрочных опытов (табл. 2), показывают, что разуплотнение почвы, уплотненной движителями тракторов с различными давлениями и кратностью прохода по одному следу и обрабатываемой ежегодно по традиционной технологии, происходит по экспоненциальной зависимости

$$\Delta \rho(t) = \Delta \rho_0 e^{kt}, \quad (3)$$

где

$$\Delta \rho_0 = \rho_{\text{сл}} - \rho_{\text{к}}$$

$\rho_{\text{сл}}$; $\rho_{\text{к}}$ – плотность на делянке, где проезжали трактора и на контроле соответственно; t – время от момента уплотнения почвы до момента посева очередной культуры, измеряемое в долях года; k – коэффициент.

Значение показателей, уравнения (1)

Культура	$Y_{\max}$, ц/га	n	C_n	C_{nn}	R^2	$\frac{C_{nn}}{C_n}$
Ячмень	46,0	1,861	2,334	1,621	0,980	0,691
Озимая пшеница	57,2	1,850	1,958	1,365	0,930	0,697
Бобово-злаковые смеси	68,8	1,840	2,029	1,324	0,997	0,652
Картофель	225	1,610	1,485	0,925	0,891	0,623

R^2 – коэффициент детерминации, полученный при определении C_n и C_{nn}

По каждому варианту опытов значение k_i определяется по уравнению:

$$k_i = \frac{\ln \Delta \rho(t_i) / \Delta \rho_{0i}}{t_i}, \quad (4)$$

$НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность (НСР) – величина, указывающая границу возможных случайных отклонений в эксперименте; это та минимальная разность в плотностях между средними, которая в данном опыте признается существенной при 5%-м ($НСР_{05}$) уровне значимости.

В результате статистической обработки получено среднее значение $k = -0,631$ и его среднее квадратическое отклонение $S_k = 0,046$.

По уравнению

$$\Delta \rho(t) = \Delta \rho_0 \cdot e^{-0,631 t} \quad (5)$$

можно определить $\Delta \rho$ в последующие годы и определять по (1) прогнозируемый недобор урожая в перспективе.

Недобор урожая Δy_{nj} при уплотнении почвы движителями сельскохозяйственных машин с учетом ширины следов, ширины других, рядом находящихся со следами зон, где изменяется плотность почвы и ширины захвата j -й машины или агрегата B_j равен:

$$\Delta y_{nj} = \frac{1}{B_j - \Delta B_j} \sum_{i=1}^n B_i \Delta y_i, \quad (6)$$

где ΔB_j – ширина зоны перекрытия при проходах агрегата B_j ; B_i – ширина i -й зоны (следов соседних с ними и других зон), где в результате прохода движителя изменяется плотность почвы; Δy_i – удельный недобор урожая в i -й зоне, определенный по уравнению (1).

Уменьшение недобора урожая в текущем году от снижения уплотняющего воздействия на почву движителей машины или агрегата:

$$y_d = s_m (\Delta y_{nj} - \Delta y_{n(j+1)}), \quad (7)$$

где s_m – обрабатываемая агрегатом в текущем году и в определенный период площадь. Для определения показателей уравнения (1), включающих в себя коэффициенты C_n и C_{nn} , показатель степени « n » и значение $Y_{\max}$ необходимо знать, оптимальное значение плотности данной почвы при возделывании определенной культуры и набор данных по плотностям в пахотном и подпахотном слоях почвы и урожайности различных культур.

В МСХА им. К.А. Тимирязева провели модельный полевой опыт, в котором оценивали изменение урожая различных культур при одно- и двукратном сплошном дополнительном уплотнении почвы [1, 3].

Результатом обработки полученных данных, представленных в табл. 3, программой «STATGRAF», используя математическую модель (1) при $K_{вп} = K_{впп} = 1$, были определены 4 показателя: $Y_{\max}$, C_n , C_{nn} и n , которые имели весьма значительные среднее квадратические отклонения, достигающие 30–70 % от средних их значений. В связи с этим была предложена следующая методика.

Модель (1) была заменена моделью для одного слоя почвы 0–40 см, имеющей вид

$$Y_i = Y_{\max} [1 - (C_n |\rho_n - \rho_{\text{опт}}|)^n], \quad (8)$$

где ρ_n – средняя плотность слоя почвы 0–40 см.

С использованием модели (8) и данных по ρ_n , Y_i , ρ_0 из табл. 2 получены значения максимальной урожайности $Y_{\max}$, n для ярового ячменя, озимой пшеницы, бобово-злаковой смеси и картофеля, табл. 3. Затем в преобразованное уравнение (1), в котором $K_{вп} = K_{впп} = 1$,

$$Y_i = Y_{\max} \{1 - [(C_n |\rho_n - \rho_{\text{опт}}|)^n + (C_{nn} |\rho_{nn} - \rho_{\text{опт}}|)^n]\} \quad (9)$$

подставляют $Y_{\max} = Y_{\max}$, $n = n$, ρ_n и ρ_{nn} из табл. 3 и находят коэффициенты C_n и C_{nn} .

Приведенные в табл. 4 показатели, определенные по изложенной выше методике с использованием данных из табл. 2, свидетельствуют, что для озимой пшеницы и сена бобово-злаковой смеси показатели n , C_n и C_{nn} и их соотношения близки. Несколько выше эти показатели у ярового ячменя и существенно ниже, за исключением соотношения C_{nn}/C_n , они у картофеля. Представленные соотношения у данных культур мало различаются, так как при среднеарифметическом значении 0,668 среднее квадратическое отклонение равно 0,036, или составляет 5,1% от среднего. Определенное по данным стационарного опыта [2], проведенного на тяжелосуглинистом Кубанском черноземе, значение C_n/C_{nn} получено равным 0,51, в связи с чем среднее значение данного соотношения рекомендовано в общем случае принять равным 0,6 и, следовательно, $C_{nn} = 0,6 C_n$.

Применение данной методики, по отдельной оценке влияния уплотнения пахотного и подпахотного слоев почвы на изменение урожайности, позволит получить более корректные результаты.

Например, для ярового ячменя расчеты по уравнению (8) показали, что $Y_{\max} = 46$ ц/га и $n = n = 1,861$. После подстановки этих показателей в уравнение (8) получено, что $C_n = 2,345$ и $C_{nn} = 1,622$. Берем из табл. 4 для яч-

Разность плотности на уплотняемых тракторами делянках и на контроле по годам, г/см³

Вариант (число проходов)	Слой почвы, см	Первый год 06.06	Второй год 30.05	Третий год 02.07	Четвертый год 20.05	Пятый год 27.06	Шестой год 02.08
		Плотность г/см ³					
1 Агромаш 90 ТГ (1....2)	0-10	0,05	0,14	0,15	0,16	0,00	-
	10-20	0,05	0,25	0,24	0,17	0,00	-
	20-30	0,12	0,15	0,14	0,14	0,00	-
	30-40	0,07	0,07	0,07	0,10	0,02	0,01
	40-50	0,02	0,01	0,03	0,04	0,04	0,02
2 Агромаш 90 ТГ (3....4)	0-10	0,12	0,22	0,24	0,22	0,01	-
	10-20	0,17	0,32	0,32	0,24	0,01	-
	20-30	0,16	0,20	0,21	0,18	0,03	-
	30-40	0,08	0,11	0,12	0,12	0,02	0,04
	40-50	0,05	0,05	0,07	0,09	0,02	0,03
3 К-744Р (1....2)	0-10	0,17	0,24	0,25	0,08	0,00	-
	10-20	0,20	0,33	0,33	0,17	0,01	-
	20-30	0,18	0,22	0,22	0,09	0,02	-
	30-40	0,11	0,13	0,14	0,07	0,03	0,04
	40-50	0,06	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
4 К-744Р (3....4)	0-10	0,19	0,27	0,28	0,13	0,01	-
	10-20	0,24	0,36	0,37	0,18	0,02	-
	20-30	0,20	0,28	0,28	0,14	0,02	-
	30-40	0,12	0,18	0,18	0,09	0,06	0,06
	40-50	0,08	0,10	0,12	0,12	0,04	0,04
5 БТЗ-245К (1....2)	0-10	0,16	0,24	0,23	0,28	0,01	-
	10-20	0,20	0,31	0,30	0,34	0,02	-
	20-30	0,17	0,20	0,20	0,25	0,03	-
	30-40	0,10	0,13	0,13	0,16	0,06	0,06
	40-50	0,04	0,05	0,07	0,11	0,03	0,04
6 БТЗ-245К (3....4)	0-10	0,20	0,25	0,28	0,31	0,02	-
	10-20	0,23	0,36	0,34	0,38	0,03	-
	20-30	0,20	0,27	0,26	0,29	0,06	-
	30-40	0,12	0,16	0,15	0,18	0,09	0,09
	40-50	0,07	0,09	0,01	0,13	0,06	0,06
7 К-744Р (1....2)	0-10	0,02	0,03	0,03	0,02	0,00	-
	10-20	0,03	0,03	0,03	0,05	0,00	-
	20-30	0,05	0,04	0,06	0,07	0,01	-
	30-40	0,05	0,07	0,09	0,12	0,03	0,01
	40-50	0,06	0,05	0,07	0,09	0,00	0,02
8 К-744Р (3....4)	0-10	0,03	0,03	0,04	0,04	0,00	-
	10-20	0,04	0,05	0,06	0,06	0,01	-
	20-30	0,08	0,08	0,09	0,11	0,03	-
	30-40	0,06	0,09	0,11	0,16	0,07	0,03
	40-50	0,07	0,08	0,09	0,12	0,04	0,04
9 К-744Р (1....2)	0-10	0,08	0,10	0,09	0,09	0,01	-
	10-20	0,08	0,11	0,11	0,07	0,01	-
	20-30	0,10	0,10	0,10	0,11	0,03	-
	30-40	0,09	0,12	0,14	0,13	0,05	0,04
	40-50	0,08	0,10	0,11	0,07	0,04	0,05
10 К-744Р (3....4)	0-10	0,09	0,13	0,11	0,13	0,01	-
	10-20	0,12	0,14	0,13	0,15	0,03	-
	20-30	0,11	0,13	0,11	0,13	0,06	-
	30-40	0,13	0,16	0,19	0,19	0,10	0,09
	40-50	0,11	0,11	0,13	0,17	0,08	0,10
11 Контроль (Плотность на неуплотненном участке)	0-10	1,03	1,04	1,14	1,11	1,10	-
	10-20	1,10	1,13	1,23	1,23	1,24	-
	20-30	1,18	1,20	1,25	1,25	1,24	-
	30-40	1,24	1,28	1,26	1,27	1,25	1,30
	40-50	1,27	1,20	1,30	1,30	1,30	1,32
НСР ₀₅	0-10	0,06	0,08	0,08	0,04	0,04	-
	10-20	0,14	0,08	0,09	0,14	0,04	-
	20-30	0,16	0,12	0,09	0,04	0,04	-
	30-40	0,05	0,13	0,08	0,05	0,03	0,04
	40-50	0,06	0,10	0,08	0,04	0,06	0,04

Данные по урожаю и плотности культур и слоев почвы

Культура	Число лет возделывания	ρ_n , г/см ³	ρ_{nn} , г/см ³	$\rho_z = \frac{\rho_n + \rho_{nn}}{2}$, г/см ³	Урожай, Y_1 , ц/га	ρ_0 , г/см ³
Бобово-злаковые	6	1,33 1,36 1,42 1,43 1,45	1,48 1,50 1,52 1,525 1,54	1,405 1,430 1,470 1,478 1,495	63,8 61,1 56,5 55,5 52,8	1,30
Ячмень	7	1,35 1,37 1,415 1,435 1,440	1,490 1,505 1,525 1,555 1,570	1,420 1,437 1,470 1,495 1,505	40,65 37,8 35,15 32,25 29,8	1,30
Озимая пшеница	7	1,35 1,35 1,36 1,37 1,38 1,41 1,43 1,46	1,48 1,50 1,51 1,51 1,52 1,52 1,54 1,56	1,415 1,425 1,435 1,440 1,450 1,465 1,485 1,510	52,5 50,7 50,6 49,9 49,6 48,9 43,5 42,7	1,130
Картофель	5	1,24 1,24 1,28 1,28 1,30 1,31 1,36 1,36	1,490 1,515 1,520 1,540 1,550 1,550 1,565 1,570	1,365 1,377 1,400 1,410 1,425 1,430 1,462 1,465	191,4 185,3 173,1 182,6 170,9 167,3 161,2 149,7	1,18

Таблица 4

Значение показателей, уравнения (1) и (9), рассчитанных с использованием данных, представленных в табл. 2

Культура	Y_{max} , ц/га	n	C_n	C_{nn}	R^2	$\frac{C_{nn}}{C_n}$
Яровой ячмень	46,3	1,862	2,335	1,621	0,980	0,691
Озимая пшеница	57,2	1,854	1,958	1,365	0,930	0,697
Бобово-злаковая смесь	68,8	1,842	2,029	1,324	0,997	0,652
Картофель	225	1,610	1,485	0,925	0,891	0,623

R^2 – коэффициент детерминации, значение которого было получено при определении C_n и C_{nn} .

меня первую строку, где $\rho_n = 1,35$; $\rho_{nn} = 1,49$. Расчеты с этими данными дают:

$$y = 46 \left\{ 1 - \left[(2,344(1,35 - 1,3))^{1,861} + (1,621(1,49 - 1,3))^{1,861} \right] \right\} = 40,01 \frac{\text{ц}}{\text{га}}$$

При снижении плотности пахотного слоя на 0,05 г/см³ и подпахотного в среднем на 0,08 г/см³ [9, с. 81] получаем значение урожая:

$$y_1 = \left\{ (1,621(1,41 - 1,3))^{1,861} \right\} = 44,14 \frac{\text{ц}}{\text{га}}$$

Сравнение полученных данных показало, что рыхление пахотного и подпахотного слоев почвы привело к росту урожайности ярового ячменя на 10,31 %. Так, при чизелевании с фрезерованием на контроле урожайность ярового ячменя увеличилась на 11,73 %, а в среднем по всем культурам – на 10,93 %.

Ниже приведен пример расчета эффективности снижения давления движителей сельскохозяйственных машин на почву по изменению ее плотности и связанному с ней изменению урожайности.

На машине РКМ-6, за счет применения шин 23,1-26 вместо 21,3-24, снижено давление задних шин на почву примерно в 1,5. В результате проведенных исследований установлено, что в период уборки сахарной свеклы (агрозона 8.1) плотность чернозема тяжелосуглинистого с влажностью 0,79 НВ в пахотном слое 0–20 см уменьшилось с 1,38 до 1,34 г/см³, а в подпахотном слое 20–40 см – с 1,37 до 1,34 г/см³, а ширина следов увеличилась с 0,528 до 0,547 м. Плотность почвы вне следов была равна в слое 0–20 см – 1,13 г/см³, а в слое 20–40 см – 1,27 г/см³. Из табл. 5 следует, что для агрозоны 8.1, средняя влажность почвы в период измерений составляла 0,7 НВ, что несколько меньше измеренной влажности. По табл. 6 для чернозема южного тяжелосуглинистого при возделывании озимых зерновых культур $\rho_{opt} = 1,20$ г/см³, $C = 2,24$ и $n = 2$.

Влажность почвы для агрозоны 8.1 (в объемных долях от НВ) в пахотном слое (подекадная)

май			июнь		
Декады месяца			Декады месяца		
1	2	3	1	2	3
$\frac{0,58 - 0,91}{0,66}$	$\frac{0,57 - 0,85}{0,62}$	$\frac{0,53 - 0,79}{0,60}$	$\frac{0,40 - 0,70}{0,55}$	$\frac{0,47 - 0,70}{0,53}$	$\frac{0,45 - 0,68}{0,52}$
июль			август		
1	2	3	1	2	3
$\frac{0,51 - 0,68}{0,54}$	$\frac{0,54 - 0,66}{0,58}$	$\frac{0,53 - 0,65}{0,60}$	$\frac{0,56 - 0,71}{0,61}$	$\frac{0,55 - 0,73}{0,62}$	$\frac{0,57 - 0,73}{0,64}$
сентябрь			октябрь		
1	2	3	1	2	3
$\frac{0,57 - 0,73}{0,64}$	$\frac{0,57 - 0,76}{0,65}$	$\frac{0,58 - 0,81}{0,69}$	$\frac{0,63 - 0,86}{0,72}$	$\frac{0,66 - 0,96}{0,75}$	$\frac{0,69 - 1,04}{0,77}$

* В числителе диапазон влажности от наименьшего до наибольшего ее значения, в знаменателе – средневзвешенное значение влажности, определенное с учетом доли площади агрогидрологического района от общей площади агрозоны.

Таблица 6

Значения оптимальных плотностей различных почв $\rho_{\text{опт}}$, коэффициентов C_n и показателей степени n

Почвы	Культуры	$\rho_{\text{опт}}$, г/см ³	C_n	n
Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый и глинистый	Озимые	1,20	2,24	2
	Кукуруза	1,20	2,24	2
	Сахарная свекла	1,19	1,66	2
Чернозем южный тяжелосуглинистый	Озимые	1,20	2,24	2
	Кукуруза	1,20	2,24	2
	Подсолнечник	1,24	2,36	2
Темно-каштановые тяжело-суглинистые	Яровые	1,18	2,21	2
	Кукуруза	1,16	2,26	2
	Сахарная свекла	1,26	2,22	2

Полагаем, что после уборки сахарной свеклы проводят пахоту на глубину 20–22 см, в связи с чем $K_{\text{вп}} = 0,72$ и $K_{\text{вп}} = 0,87$. Среднюю урожайность, в соответствии с данными за предшествующие 5 лет принимаем равной $Y_{\text{max}} = 40,2$ ц/га.

Согласно уравнению (1) прогнозируемый удельный недобор урожая озимых культур равен: для РКМ-6 с шинами 21,3–24:

$$\Delta y_1 = 40[2,24|1,36 - 1,20|0,7]^2 + (2,24 \cdot 0,6|1,35 - 1,20|0,85)^2 = 3,69 \text{ ц/га};$$

для РКМ-6 с шинами 23,1–26

$$\Delta y_2 = 40[2,24|1,32 - 1,20|0,7]^2 + (2,24 \cdot 0,6|1,32 - 1,20|0,85)^2 = 1,17 \text{ ц/га};$$

С учетом ширины захвата РКМ-6 равной 2,7 м и ширины следов удельный недобор урожая по рассматриваемым вариантам будет равен:

$$\Delta y_{n1} = \frac{2 \cdot 0,526 \cdot 3,69}{2,7} = 1,438 \text{ ц/га};$$

$$\Delta y_{n2} = \frac{2 \cdot 0,545 \cdot 2,168}{2,7} = 0,875 \text{ ц/га}.$$

Уменьшение недобора урожая в текущем году от снижения воздействия движителя РКМ-6 на почву по уравнению (7) равно:

$$y_d = S_m(\Delta y_{n1} - \Delta y_{n2}) =$$

$$= 324 \cdot (1,438 - 0,875) = 18,3 \text{ т},$$

где $S_m = A \Pi_k = 300 \cdot 1,08 = 324$ га;

A – нормативная годовая загрузка РКМ-6; $A = 300$ ч; Π_k – сменная часовая производительность.

При обеспечения допустимого воздействия движителями РКМ-6 на почву дополнительный урожай

за год будет равен $Y_{\text{дд}} = 324 \cdot 1,438 = 46,6$ т.

В случае установки шин 23,1–26 масса комбайна увеличивается ориентировочно на 250 кг и, следовательно, соотношение общей, получаемой за срок службы комбайна, массы зерна, равной $18,2 \cdot 8 = 145,6$ т, к приросту массы комбайна равно:

$$145,6/0,25 = 583,4 \text{ т},$$

$$18,3/0,25 = 72,9 \text{ т} - \text{при годовом соотношении}.$$

Из этого следует, что увеличение стоимости РКМ-6 за счет установки шин типоразмера 23,1–26 окупится у потребителя за один год, если добавленная стоимость этих шин будет меньше стоимости 18,3 т зерна пшеницы.

Закключение. Для оценки недобора урожая различных сельскохозяйственных культур, при несоответствии плотности почв в пахотном и подпахотном слоях оптимальному значению, разработана математическая модель, позволяющая отдельно определять влияние на недобор урожая сложения пахотного и подпахотного слоев почвы с учетом динамики ее изменения во времени.

Разработанная методика позволяет наиболее корректно определять показатели математической модели,

установление по набору сопряженных данных по плотности слоя 0–40 см и урожаю, величины максимального урожая конкретных культур, показателя степени модели, а после подстановки этих показателей в преобразованное уравнение, определение входящих в нее коэффициентов C_n и C_m при введении в это уравнение значений плотностей почвы в пахотном и подпахотном слоях.

Выполненная с использованием полученной математической модели расчетная оценка эффективности снижения давления на почву задних шин РКМ-6 в 1,4 раза путем замены шин 21,3-24 на шины 21,3-26 с получением данных по изменению в слоях 0–20 и 20–40 см плотности почвы по следам РКМ-6 с указанными вариантами шин, позволила установить, что по следам шин 23,1-26 удельный недобор урожая зерновых уменьшится на 1,52 ц/га, а с учетом норматива сезонной уборки сахарной свеклы с поля равного 324 га общий недобор урожая уменьшится на 18,2 т при росте массы РКМ-6, от установки этих шин, на 0,25 т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Депрессия урожая сельскохозяйственных культур при уплотнении почвы и приема ее снижения / А.И. Пупонин [и др.] // Сб. научных трудов ВИМ. – М., 1988. – Т. 118. – С. 75–86.
2. Изменение плотности, твердости и плодородия Кубанского чернозема под воздействием движителей тракторов / В.А. Русанов [и др.]; НТБ ВИМ. – 1989. – Вып. 75. – С. 10–14.

3. Ревут И.Б., Соколовская Н.А., Васильев А.М. Структура и плотность почвы – основные параметры, кондиционирующие почвенные условия жизни растений // АФИ. «Пути регулирования почвенных условий жизни растений». – Л., 1971. – С. 51–125.

4. Русанов В.А. Воздействие движителей на почву: направление решения проблемы // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1992. – № 3. – С. 36–49.

5. Русанов В.А. Комплексное улучшение характеристик полевой техники при снижении ее давления на почву // Техника в сельском хозяйстве. – 1993. – № 1. – С. 21–23.

6. Экологическая безопасность системы «механизированное средство–почва–урожай» / З.А. Годжаев [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 5-1. – С. 75–79.

Годжаев Захид Адыгезалович, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия.

Лавров Александр Владимирович, канд. техн. наук, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия.

Русанов Александр Вадимович, инженер, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия.

Загоруйко Михаил Геннадьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия.

109428, г. Москва, 1-й Институтский пр-д, 5.

Тел.: (499) 174-87-61

Ключевые слова: движители сельскохозяйственной техники; недобор урожая; давление на почву; эффективность; математическая модель; почва.

MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE SHORTAGE OF CROPS FROM OVERCONSOLIDATION OF THE SOIL BY THE MOVERS OF AGRICULTURAL MACHINES

Godzhaev Zahid Adygezalovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM. Russia.

Lavrov Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM. Russia.

Rusanov Aleksandr Vadimovich, Engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM. Russia.

Zagoruiko Mikhail Gennadyevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM. Russia.

Keywords: movers of agricultural machinery; crop shortage; pressure on the soil; efficiency; mathematical model; soil

The researches of impact assessment of agricultural machines' movers are done in all countries with the use of mobile energy vehicles, which are used for the rolling of the soil with different multi-

plicity of passes through the fields. Mathematical model is developed taking into account the adding of arable and subsurface layers' impact on field productivity. It allows one to predict the yield of crops based on impact of agricultural vehicles that perform technological operations, taking into account the width of the track, width of the unit and overlap area. Method of correct determination of indicators of mathematical model is developed. It includes adjustment of the density of the soil layer 0-40 cm and maximum yield value, the exponent of the model. It also includes determination of the coefficients included in it the transformed equation, which corresponds to the mathematical model, after substitution of these indicators in it. Evaluation of the effectiveness of the pressure of the rear tyres of the beet harvester RKM-6 reduction is performed. The pressure became lower by replacing the tires 21,3-24 on the tires 21,3-26 with data on the change in the soil density in 0-20 and 20-40 cm layers where the RKM-6's tracks.